

高精度時刻同期スイッチングハブ

立石 靖 Yasushi Tateishi
越谷 涼 Ryo Koshiya
田島昌明 Masaaki Tajima

キーワード スイッチングハブ、高精度時刻同期、保護継電器、PTP

概要



MEISWAY SW600F

電力・産業用システムでは、各機器を同期させるためネットワークを介して高精度の時刻同期を行う。このとき伝送路に一般的なスイッチングハブを適用すると、パケットサイズの違いによって生じるパケット転送時間の差で、パケットが追突遅延し時刻同期精度に大きな影響を与える。

産業用ギガビット・レイヤー2スイッチングハブ MEISWAY SW600Fは、IEEE 1588v2 (PTP^(注1)) 技術を適用することでスイッチングハブの転送時間の変動による影響を受けことなく、高精度の時刻同期ができる。また、ネットワーク負荷が多少高いシステムでも安定して運用できる機能を実装している。

1 まえがき

保護継電器は複数の変電所間で電流波形を同時測定するため、タイミング制御が必要である。一般的なEthernet回線でタイミング制御を行うと、スイッチングハブのストアアンドフォワード^(注2)の影響でタイミングに誤差が発生する。そのため従来の保護継電器システムは、カットスルー^(注3)による専用装置と専用回線を採用している。

このストアアンドフォワードの影響は送信パケットの取り扱いを注意することで緩和できるため、最近では一般的なEthernet回線を適用した保護継電器システムが増えている。

ストアアンドフォワードの影響を完全に排除するには、IEEE 1588v2 (以下、PTP) による高精度の時刻同期が適切である。また保護継電器の波形データは短い周期で大量に送信されるため、一般的な監

視制御システムより伝送環境が厳しい。

これらの問題を解決するため、保護継電器用ギガイーサネット・スイッチングハブとしてMEISWAY SW600F (以下、SW600F) を開発した。本稿では、保護継電器に適用するSW600Fを紹介する。

2 PTPの必要性

2.1 ネットワークの伝送遅延

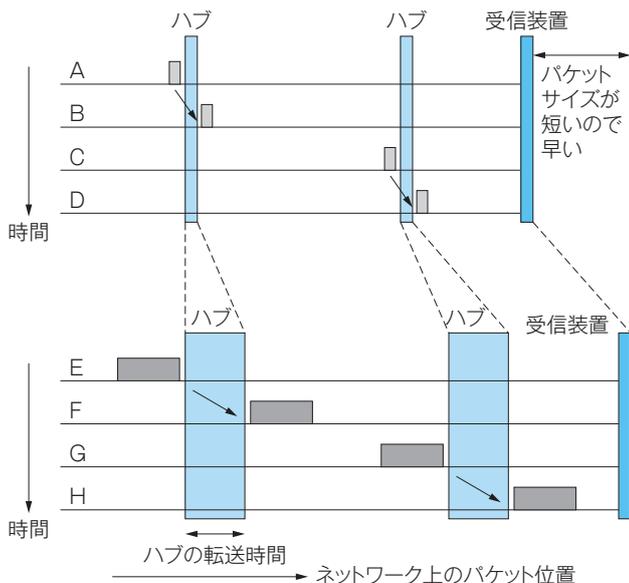
基準時計^(注4)が時刻を配信すると、受信側の機器は伝送遅延によって少し過去の時刻を受信する。そのため、受信側の機器は伝送遅延の分を補正して時計を合わせる必要がある。伝送遅延時間が不明なときはパケットを往復させ、往復時間の半分を伝送遅延とする。ただし、行きと帰りの伝送時間が同じでなければならず、もし差異があると誤った補正でタイミングがずれて保護継電器の動作に支障を与える。

伝送遅延時間には通信回線による遅れと、スイッチングハブの転送処理の遅れが含まれる。光ファイバ回線の場合、遅延は行きも帰りも光速の約70%で、同じ経路であれば差異はない。スイッチングハブの転送時間はパケットサイズによって異なるが、行きも帰りも同じパケットサイズであれば差異はない。**第1図**にパケットサイズによる遅延の比較を示す。パケットサイズが大きいほど転送時間が遅くなる。

2.2 ストアアンドフォワードの影響

パケットサイズによってスイッチングハブの転送時間が異なるのは、ストアアンドフォワードによる動作が影響している。スイッチングハブはパケットを受信し始めると一旦内部メモリに格納し、パケットを最後まで受信してから送信（転送）を開始するため、パケットサイズが大きいほど内部メモリに滞留する時間が長くなり転送時間を要する。

行きも帰りも同じパケットサイズであれば転送時間は同じなので補正できるが、前後にサイズの異なるパケットが存在すると、小さいパケットは大きいパケットを送出している最中に追突し順番待ちとなるため、小さいパケットのみの転送時間よりも時間がかかる。**第2図**には小さいパケットの追突と



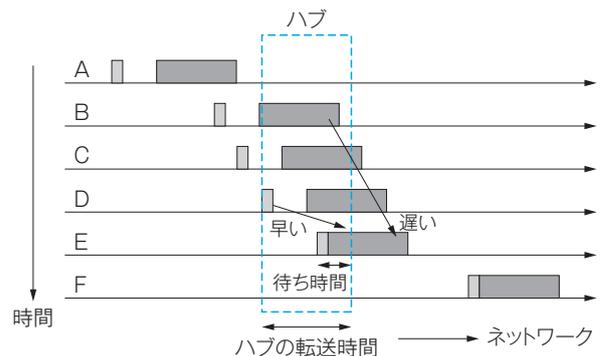
第1図 パケットサイズによる遅延の比較

小さいパケットと大きいパケットが、2台のスイッチングハブを通過して受信するまでを示す。スイッチングハブはパケット全体を受信してから送信するため、大きいパケットほど転送時間がかかり遅れる。

遅延を示す。この追突現象による時刻同期の誤差は大きく、伝送速度1Gbpsで1518byte^(注5)のパケットに続いて64byteのパケットを送信したとき、スイッチングハブを1台通過するたびにパケット間隔は約12 μ s短くなり、追突後は12 μ s遅れる。

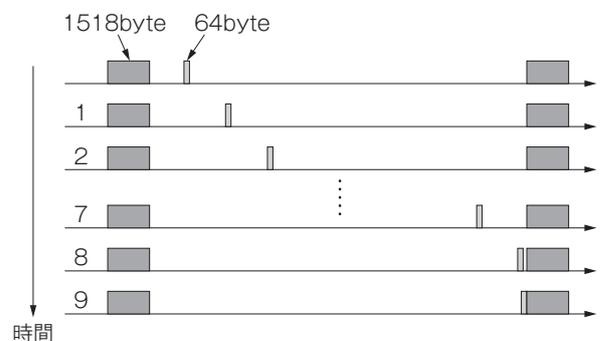
第3図に伝送負荷とハブ台数による遅延を示す。1518byte、1Gbpsの10%負荷の環境で64byteパケットを送信したときの追突と遅延である。伝送負荷のパケット間隔は広く余裕があるが、スイッチングハブを10台通過したとき、64byteパケットはどのタイミングで送信しても追突して遅延する。その遅延時間は6～121 μ s、時刻同期の誤差はその半分の3～61 μ sとなる。

このストアアンドフォワードによる影響を軽減するには、パケットサイズ・伝送負荷・ハブ台数を制限する必要がある。



第2図 小さいパケットの追突と遅延

スイッチングハブ内では大きいパケットの転送速度は遅いため、小さいパケットが追突する。その後、小さいパケットは毎回大きいパケットの送信完了待ちとなるため遅延が増大する。



第3図 伝送負荷とハブ台数による遅延

伝送負荷があると時刻同期の小さいパケットが追突して遅延するため、時刻同期に誤差が発生する。**第3図**の送信タイミングでは9台目で追突し、10台目で遅延が発生する。

第1表 基本仕様

時刻同期 IEEE 1588v2 準拠・帯域制御・アクセスリスト機能を実装する。

項目		仕様
スイッチングモード		ストアアンドフォワード
スイッチ容量		13.7Gbps 2.66Gbps (全二重/全ポート 100Mbpsの場合)
伝送方法		全二重/半二重
ポート 構成 (最大18 ポート)	10/100/ 1000BASE-T	16ポート(4ポートは光ポート とのコンポポート)
	光ポート (最大 4ポート)	1000BASE- LX 使用コネクタ: LC SMF (シングルモードファイ バ) 対応 10km 及び長距離 (40km) 対 応
異常出力端子		1 接点
MAC (Media Access Control address) アドレス容量		8000個
フロー制御		IEEE 802.3x (全二重)・ バックプレッシャ (半二重)
迂回 機能	サポートプロトコル	改良形スパニングツリープロ トコル (RTP)
	ネットワーク構成	光ポートによるループ構成
	迂回処理時間	RTP: 0.5秒以内 (32ノード 時)
VLAN (Virtual Local Area Network)		IEEE 802.1Q 準拠 タグ及び ポートベース VLAN
時刻同期		IEEE 1588v2 準拠 (EtoE トラ ンスペアレント ^(注6)) 外部パルス出力, 同期正常の信 号出力
優先制御・帯域制御・アクセ スリスト		IP・ポート番号などによって パケットを区別 指定パケットの優先送信・帯 域制限・破棄が可能
エラーパケットフィルタリング 機能		ショートパケット・ロングパ ケット・FCS (Frame Check Sequence) エラーパケット・ シンボルエラーパケット
ネットワーク管理		SNMPv1 (RFC1157 準拠)・ MIB II
ネットワーク運用		telnet・http・ICMP (Internet Control Message Protocol)・ IP
ストーム抑止		設定によってブロードキャス ト・マルチキャスト・宛先未 学習パケットの破棄が可能
シリアルコンソール		EIA/TIA-232-E 準拠 丸形コ ネクタによる
設定保存・書き込み・ファーム ウェア更新		Web (http) 又はシリアルポ ート経由による

3 SW600Fの基本仕様と特長

第1表にSW600Fの基本仕様を、第2表に環境条件を、第3表にポート構成を示す。

3.1 SW600Fの時刻同期

3.1.1 PTP

PTPを適用すると、スイッチングハブにおける転送時間を測定して補正する。そのためパケットの追突によって遅れて送信されても補正されるため、時刻同期には影響がない。

時刻同期には、隣接する区間のみ補正するポイン

第2表 環境条件

電力用規格B-402に準拠する。

項目		仕様
形式		UT227/**A (*はタイプによる)
電源コネクタ		3P端子台 (DC)
電源電圧範囲		DC80V ~ 143V
消費電力 (動作時)		25W以下
使用温度範囲 (動作時)		-20 ~ 55°C
絶縁耐圧	電源1次- FG又はSG	AC 2000V 1分間
	電源1次- FG又はSG	DC500V 5MΩ以上
絶縁抵抗		DC500V 5MΩ以上
電源ノイズ耐量		方形波インパルスノイズ 2kV, 50ns/1μs
質量		約4kg
外形寸法		W255 × H88 × D250mm (突起含まず)
適合規格		電力用規格B-402 準拠 (突入電流は除く)

第3表 ポート構成

10/100/1000BASE-Tを16ポート、光ポート (1000BASE-LX)を2ポート又は4ポート搭載する。

タイプ	タイプ別ポート構成	
	10/100/1000 BASE-T	光ポート (1000BASE-LX)
TYPE 10	16	2 (シングルモード10km), LCコネクタ, 1Gbps
TYPE 11	16 ^{*1}	4 (シングルモード10km), LCコネクタ, 1Gbps
TYPE 12	16	2 (シングルモード40km), LCコネクタ, 1Gbps
TYPE 13	16 ^{*1}	4 (シングルモード40km), LCコネクタ, 1Gbps

注: *1. 16ポート中の2ポートは光ポートとのコンポポートのため、同時には使用できない。

ト・ツー・ポイントと、基準時計と末端装置の途中にある装置で補正するエンドツーエンド (EtoE) の方法がある。SW600FはEtoEによる補正を実装している。このSW600Fを10台経由させて、1518byteパケットを伝送負荷100%として加えても、時刻同期の誤差は1 μ s未満である。

3.1.2 同期タイミングの外部出力

1Hz・50Hz・60Hzなど設定した周波数の同期クロック信号を出力する機能を有する。SW600Fは保護継電器の用途を想定しているが、この外部クロック信号を測定装置や各種装置に接続することで遠方にある装置を同期できる。PTPによる時刻同期を行うハブでは、同期信号を外部に出力することがSW600Fの大きな特長である。

3.1.3 基準時計

遠方にある各装置 (SW600F) は、基準時計を参照して時刻を合わせる。この基準時計は通常、標準時 (UTC〈協定世界時〉・JST〈日本標準時〉など) の絶対時刻が使用され高価である。保護継電器システムは、装置間のタイミングが同期すれば標準時に同期する必要はない。SW600Fは自身が簡易な基準時計として動作できる。また基準時計が故障などで喪失したとしても、他のSW600Fが基準時計となってマスタクロックの機能を引き継ぐことができる。

4 優先制御・帯域制御・アクセスリスト

一般的な監視制御システムのネットワークでは、確実に相手に情報を伝達させる必要がある。そのため、瞬間的な伝送負荷でハブの内部メモリがオーバーフローしてパケットが破棄されないように、アプリケーションの送信周期を余裕のある設計とするか、あるいはソフトウェアによる送達確認と再送プロトコルで対処する必要がある。

ところが保護継電器の波形データは短い周期で大量に送信するため、一般的な監視制御システムと比較すると伝送負荷が高い。ソフトウェアによる送達確認と再送は時間的に難しく、スイッチングハブ内部のメモリ処理能力を超えるパケットが入力されると破棄されるため保護機能に支障を与える。スイッ

チングハブ内部のメモリが処理しきれなくなる要因として、以下の例が考えられる。

- (1) 入出力の伝送速度が異なる 1Gbpsポート → 100Mbpsポートへの転送で内部メモリを10倍使用する。
- (2) 入出力ポート数 複数ポートから同時に入力されて一つのポートに集中して転送された時、内部メモリの滞留時間は各パケットサイズの合計になる。
- (3) 半二重やフロー制御による送信待ち 伝送条件の設定として半二重通信又はフロー制御を行うと、送信待ちの時間が発生し、その間受信パケットは内部メモリに滞留する。

保護継電器では入出力ポート数による問題が発生しやすい。伝送速度に対し内部メモリサイズが小さいため、瞬間的負荷増大に対応できず内部メモリがオーバーフローする可能性がある。伝送負荷は1秒間の伝送量で表現されるが、内部メモリのオーバーフローは瞬間的な伝送負荷で考える必要がある。保護継電器の波形データは周期的に送信するため伝送負荷は一定であるが、時刻同期によって送信タイミングが集中する。それ以外のパケットも瞬間的な負荷集中状態にならないように配慮する必要がある。

SW600Fは以下の三つの機能を実装し、保護継電器の機能を阻害することなく安定させる。

4.1 優先制御

送信するパケットを最大8種類に分類し、優先度の高いパケットから送信する機能である。時刻同期のパケットや波形データなどの重要なパケットの優先度を高く設定することで、重要なデータの喪失と遅延を防ぐことができる。

4.2 帯域制御

パケットの種類に応じて回線の帯域を割り当てる機能で、帯域を超過したパケットは破棄される。波形データなど正規のパケットも何らかの不具合によって大量送信した場合には破棄される。またARP (Address Resolution Protocol) の送信も制限されるため、他の機器に対してARP負荷を軽減できる。

4.3 アクセスリスト

アクセスリストに設定した条件のパケットのみを転送することで、想定外の通信あるいは不正な通信を制限できる。

5 むすび

SW600FはPTPによってストアアンドフォワードによる遅延の影響を排除して高精度の時刻同期を行い、優先制御・帯域制御・アクセスリストの機能によって保護継電器の機能を阻害することなくネットワークを安定させることができた。

優先制御・帯域制御・アクセスリストの機能は、一般的な監視制御システムでは、画像・音声・IoT (Internet of Things), AI (人工知能) による大量データを扱うときにも有用である。また、PTPはタイミング制御として他製品へ展開できる。

今後は、冗長性・安定性・保守性などの性能を向上し、製品開発に寄与していく。

- ・Ethernetは、富士ゼロックス(株)の登録商標である。
- ・本論文に記載されている会社名・製品名などは、それぞれの会社の商標又は登録商標である。

(注記)

注1. PTP (Precision Time Protocol) : 高精度で時刻同期するための通信プロトコル

注2. ストアアンドフォワード : 内部メモリにパケットを取り込んでから送信する方法。遅延時間は変動で、壊れたパケットの破棄が可能

注3. カットスルー : ビット単位で送信する方法。遅延時間は固定(数ビット)で、壊れたパケットの破棄が不可能

注4. 基準時計 (Grandmaster Clock) : 正しい時刻を配信する時計

注5. 1518byte : Ethernetにおける最大パケットサイズ(一般的には1518byteとなるが各種設定によって増減)

注6. EtoEトランスペアレント : 最終装置間で時刻同期を行うための機能(隣接する装置間で時刻同期を行うのはPtoPトランスペアレント)

《執筆者紹介》



立石 靖
Yasushi Tateishi
製品技術研究所
通信関連機器の開発に従事



越谷 涼
Ryo Koshiya
製品技術研究所
通信関連機器の開発に従事



田島昌明
Masaaki Tajima
製品技術研究所
通信関連機器の開発に従事